

## バーチカルドレーンによる三次元圧密時の地盤内部挙動の測定と解釈

### Measurement and Interpretation of Three-Dimensional Consolidation Behavior in Clayey Ground Improved by Vertical Drains

白 元珍 Wonjin BAEK  
森脇 武夫 Takeo MORIWAKI  
菊地 佳誉 Yoshitaka KIKUCHI

(広島大学大学院工学研究科)  
(広島大学大学院工学研究科)  
(株) 四国旅客鉄道

バーチカルドレーンによる三次元圧密のメカニズムを明らかにすることを目的として、本研究ではバーチカルドレーン打設地盤をモデル化した三次元圧密試験機を用いて模型実験を行い、地盤内部の変位や間隙水圧の経時変化を測定し、慣用設計に用いられている弾性理論解との比較を行いつつ、三次元圧密時の地盤内部挙動を検討した。その結果、三次元圧密過程では、供試体内部は鉛直沈下だけではなく、圧密前半部ではドレーン側(内側)に向かって水平方向に変位し、圧密後半部では外向きに変位するが、元の位置までは戻らないこと、その傾向はドレーン側で顕著であり非排水面側ではほとんど元の方向へ戻らないこと、また、半径方向変位量はドレーン側ほど大きくなり、圧密圧力の増加とともに大きくなること、などが明らかになった。

キーワード：バーチカルドレーン，三次元圧密，内部変位，間隙水圧

IGC (D 05)

### 1. はじめに

バーチカルドレーン工法は誕生以来約 70 年の歴史をもち、現在では軟弱地盤の代表的改良工法として広く用いられている。しかし、施工例が増し工法が多様化するにつれてバーチカルドレーン工法の有効論と無効論の議論が多くなされてきた。その中でバーチカルドレーンの無効説を主張している日本道路公団<sup>1)</sup>でも、「沈下促進には効果がないが、地盤内の間隙水圧や強度は無処理地盤と処理地盤とで明らかに有意差があり、バーチカルドレーンの効果は認められる」という方向に変わってきている。これは、無処理地盤とバーチカルドレーン打設地盤の内部で何か異なる現象、すなわち、ひずみの積分量である地表面沈下量は同じであっても地盤内のひずみの種類(体積ひずみかせん断ひずみか)及びひずみの分布が異なっていることを暗示している。

また、バーチカルドレーン工法の設計において主として用いられている Barron の解<sup>2)</sup>は、弾性圧密理論に基づいたものであり、実際の粘土地盤で生じる二次圧密を考慮することができない。この問題に対して、Yoshikuni et al<sup>3)</sup>は圧密現象のようなひずみ速度の小さい範囲では粘土を弾粘性液体として取り扱うことができるとし、今まで説明できなかった二次圧密や有効応力緩和現象を考慮できる弾粘性圧密理論を導いた。しかし、この理論は一次元条件下での理論であるため、森脇ら<sup>4)</sup>は弾粘性圧密理論の三次元化を行い、バーチカルドレーン工法を用いた場合の粘土の挙動を表現できる弾粘性圧密方程式を導いている。

本研究では、このようなバーチカルドレーン打設地盤

を対象とした三次元圧密のメカニズムを解明するために、バーチカルドレーン打設地盤内部の応力分布、ひずみ分布、間隙水圧の分布などを三次元的に検討していく必要があることを示し、三次元弾粘性圧密理論の適用性を検討するための実測データを得ることを目的として、バーチカルドレーン打設地盤をモデル化した三次元圧密試験機を製作して模型実験を行った。この試験機では、供試体内部の三次元的な変形量を測定する方法を新たに開発した。本論文では、この供試体内部の三次元的な変形の測定方法、この方法によって測定された三次元挙動を示すとともに、弾性理論を用いた解析結果と比較しつつ、バーチカルドレーンによる三次元圧密時の内部挙動メカニズムを検討する。

### 2. バーチカルドレーンによる三次元圧密の内部挙動メカニズム

バーチカルドレーン打設地盤では間隙水の移動方向(水平方向)と変形(沈下、鉛直方向)の進行方向とが一致せず、圧密形式は三次元圧密となる。また、載荷条件や改良条件の違いによって様々な境界条件になることが知られている。そのうち、最も一般的な境界条件としては、ドレーンの直径は圧密期間中変化せず、また、地盤上端面も平面を保って沈下する場合であり、等(鉛直)ひずみ条件と呼ばれている。

住岡ら<sup>5)</sup>によって、三次元圧密過程において半径方向の含水比、ひずみ、および応力分布が一様にならないことが確認された。また、排水面近傍の粘土に著しい応力集中があること、および地盤内部では排水面から非排水

面方向へ向かうひずみが発生していることを明らかにしている。しかし、この研究においては、サンドドレーンに直接鉛直荷重が作用しないように載荷板と粘土層表面の間にサンドドレーンと等しい直径の穴のあいたアクリル板を挿入し鉛直荷重が粘土部分にのみ作用するように配慮されているが、アクリル板の厚さが 8mm であるのに対して最終沈下量は約 20mm であるため、圧密後半ではサンドドレーンに鉛直荷重が直接作用し、半径方向に膨張し、このことが結果に何らかの影響を与えていると思われる。

一方、パーチカルドレーンの圧密理論では、サンドドレーンは応力を負担しないと理想化されることが一般的である。本研究ではこれらの圧密理論の適用性を検討することが研究目的の一つであるため、その理想化に沿い、ドレーンに応力が作用しない構造の圧密試験機を使用することで、ドレーン周辺の粘土への応力集中や粘土の内部挙動などをより正確に検討する。

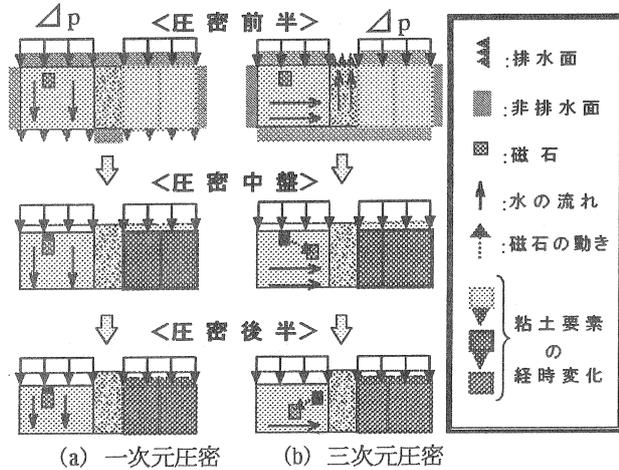
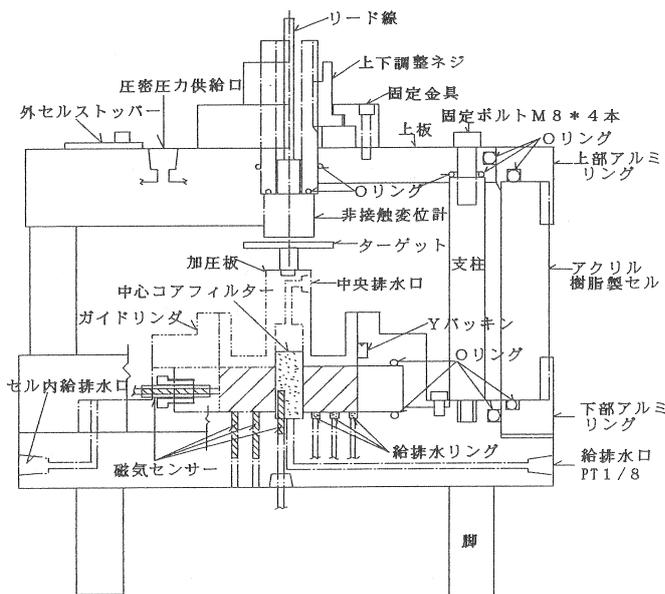


図-1 三次元圧密の内部挙動メカニズム  
(排水方向：鉛直方向) (排水方向：水平方向)

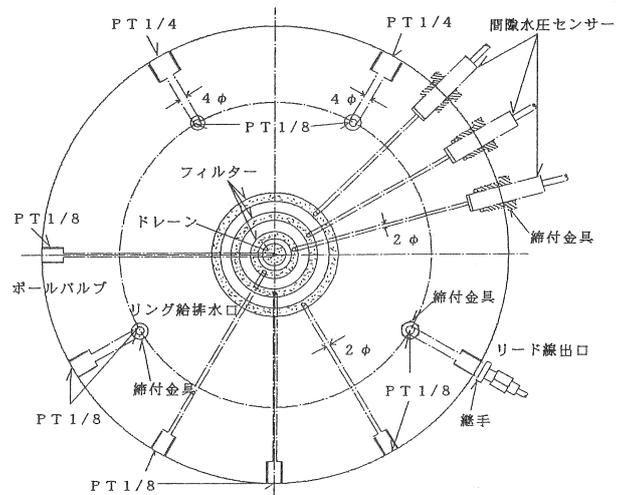
パーチカルドレーンによる圧密メカニズムを一次元圧密と比較しつつ説明する。図-1(a)は一次元圧密過程を、図-1(b)はパーチカルドレーンによる三次元圧密過程を表したもので、各図におけるドレーンの左側は埋め込んだ磁石の動きを、右側は分割した要素の変形を表している。図-1(a)に示した一次元圧密（この図では底面からの片面排水）では、間隙水の移動と変形方向とが共に鉛直方向にだけ生じるので、供試体内に埋め込んだ磁石は鉛直方向にのみ移動し、分割した要素も全て鉛直方向にのみ変形する。一方、間隙水が内向き放射流れであるパーチカルドレーンによる圧密では、圧密初期にドレーン側(内側)の粘土要素では間隙水圧の消散が進むために大きな体積ひずみが生じるが、非排水面側(外側)の要素では間隙水圧の消散が遅いために体積ひずみはほとんど生じない。しかし、前述したような等(鉛直)ひずみ条件のもとでは図-1(b)の圧密中盤の変形条件となるため、非排水面側では(非排水)せん断ひずみが生じ、非排水面側からドレーン側に向かって半径方向変位が生じる。一方、圧密後半にかけては、非排水面側の要素で間隙水圧の消散に伴って体積ひずみが生じるが、ドレーン側の要素では体積ひずみがほぼ終了しているためにせん断ひずみが卓越する。そのため、等(鉛直)ひずみ条件を保つように図-1(b)の圧密後半に示したようにドレーン側から非排水面側に向かって半径方向変位が生じると考えられる。本研究では、このような供試体内部の挙動が実際にどのように起きるかを模型実験によって調べる。

### 3. 三次元圧密試験機

三次元圧密試験機の断面図を図-2に示す。本試験機の概要および特徴は次のとおりである。まず、載荷圧密圧



(a) 試験機断面図



(b) 底盤断面図

図-2 三次元圧密試験機

方は、セル内に満たした水に加圧する空気圧で制御し、圧密中の供試体間隙水とセル水は、0-リングと加圧板とガイドリングにはめ込んだYパッキンにより、完全分離されている。圧密中の供試体からの給排水は、一般に用いられる上下面からの鉛直方向の排水、圧密リング側面および中央コア部を介しての水平方向の排水が可能になっている。これらの排水条件のうち、圧密リング内の供試体中心部のドレーンのみから排水させることによってバーチカルドレーン打設地盤で生じる内向き放射流れを再現した三次元圧密が可能となっている。また、底盤の排水面はリング状に3つのブロックに分けられていて、それぞれ給排水および間隙水圧測定が可能であり、供試体の半径方向の間隙水圧分布を調べることができる。また、供試体の軸方向変位は、上盤に固定した非接触渦電流式ギャップセンサーで測定する。さらに、供試体内部の変位挙動は、供試体内部に埋め込んだ磁石(3mm, 立方体)の磁界強度を底盤部2ヶ所, 中心コア部1ヶ所, 圧密リング1ヶ所の磁気ホール素子により、電圧値として検出し、その変化量より変位を測定することができる。

#### 4. キャリブレーション実験

本研究では、供試体内部に埋め込まれた磁石の位置を供試体中央のドレーン内部と外周の圧密リング内に設置した磁気センサーで磁石の磁界強度を測定することによって特定し、その磁石の位置の変化から供試体内部の変位を求めている。そのため、まず磁石の位置と各磁気センサーで計測される磁気強度(以後、磁気センサー値)の関係性を明らかにするキャリブレーション実験を行う。

具体的には、磁石が半径および円周方向には変位せず鉛直方向のみに変位する場合の磁石の鉛直位置と磁気センサー値の関係を磁石の半径方向位置を変えて明らかにした。そのため、三次元圧密時の内部変位を測定する通常の試験では供試体内の所定の位置に磁石を埋め込むことになるが、キャリブレーション実験では磁石の半径方向、円周方向の変位が起らないように磁石を上部載荷板に固定し一次元圧密をすることによって、磁石が鉛直一次元的に変位した時の磁気センサー値を読み取った。

また、磁石を埋め込んだ半径方向位置は図-3に示すよう供試体の中心から  $r=10.0\text{mm}$ ,  $12.5\text{mm}$ ,  $15.0\text{mm}$ ,  $17.5\text{mm}$ ,  $20.0\text{mm}$ ,  $22.5\text{mm}$ ,  $25.0\text{mm}$  の  $2.5\text{mm}$  間隔の7箇所である。なお、キャリブレーション実験でも

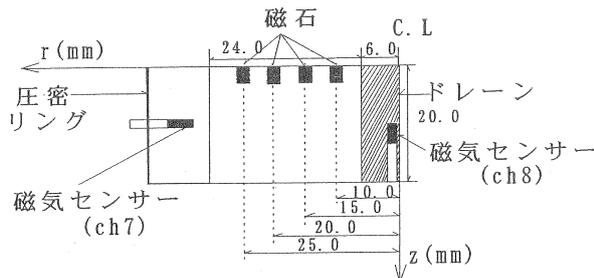


図-3 キャリブレーション時の磁石埋め込み位置

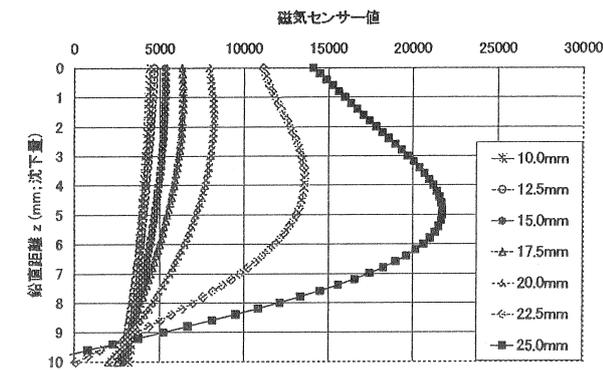
三次元圧密時の地盤内部挙動を調べる本実験との状態を合わせるために、中央ドレーンを設置したままで行った。また、キャリブレーション実験の場合は、三次元圧密実験で設定した実験条件で生じる最大約  $10\text{mm}$  まで鉛直変位を強制的に(実験のはじめから沈下量を計測しつつ、できるだけ一定の比率で沈下が起るように圧力を上げて)起こす必要があるため、超軟弱の粘土(含水比を160%程度に調整した広島粘土)を用いた。なお、キャリブレーション時の誤差を減らすために毎回同じ磁石を用い、半径方向位置が同じ実験を3回ずつ行い、鉛直位置に対応する磁気センサー値の平均値を求めた。

#### 4.1 キャリブレーション実験結果

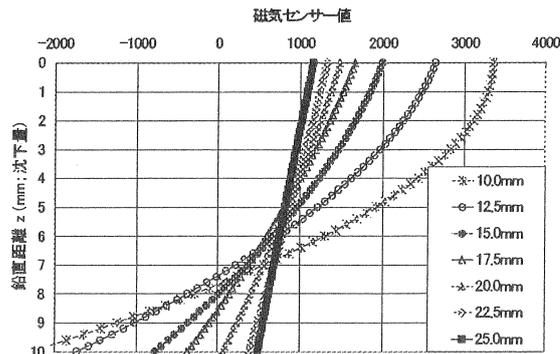
図-4の(a)と(b)は磁石の各半径位置ごとの鉛直変位(圧密リング上端面から磁石上面の距離)と磁気センサー値の関係を表した実測値である。なお、本実験で測定した磁気センサー値は、無磁界出力電圧を $\pm 0.2\text{V}$ 以内にし、磁界強度に比例して $\pm 8\text{V}$ で出力される電圧値を無次元量に換算したものである。また、図-4の(c)と(d)は図-4の(a)と(b)を近似曲線で表したものである。後述する半径方向変位の算出には、離散的に得られている実測値を補間する必要があるため、実測値を滑らかな曲線で連ねた近似曲線を用いた。これらの図より分かるように、圧密リング側に設置されているCh7の磁気センサー値は、磁石を埋め込んだ半径位置がセンサーに近い場合(例えば、 $r=25.0\text{mm}$ の場合)、鉛直変位が増加するにつれてまず増加し、鉛直距離5mm付近で最大値を取り、その後減少する傾向を表す。また、磁石を埋め込んだ半径位置がセンサーに近いほど磁気センサー値が大きく、また隣の半径位置の曲線との差も大きいことが分かる。また、Ch8の磁気センサー値は、鉛直変位が増すにつれて全て減少しており、磁石を埋め込んだ半径位置が磁気センサーに近い $r=10, 12.5, 15\text{mm}$ の場合に磁気センサー値が大きく、また隣の差も大きいことが分かる。この磁石の半径位置の違いによるセンサー値の差が大きいほど磁石の水平位置が正確に算出できる。また、前述した試験機の底盤に設置されているCh5とCh6では鉛直変位と磁気センサー値の関係に半径位置の違いが明確に現われなかったため(図は省略)、磁石の位置を決定するのにCh5とCh6のデータは用いなかった。

また、図-4から分かるように、磁石の埋め込み位置によって、磁気センサー値の感度が異なり、試験機の圧密リング側に設置されている磁気センサーCh7の場合は、供試体中心から遠い20, 22.5, 25mmに磁石がある時の感度がよく、中央ドレーン内部にある磁気センサーCh8の場合は、供試体の中心に近い10, 12.5, 15mmに磁石がある時の感度がよい。そのため、磁石の埋め込み位置が $r=10, 12.5, 15\text{mm}$ の場合はCh8,  $r=20, 22.5, 25\text{mm}$ の場合はCh7を用いて半径方向変位を算出する。

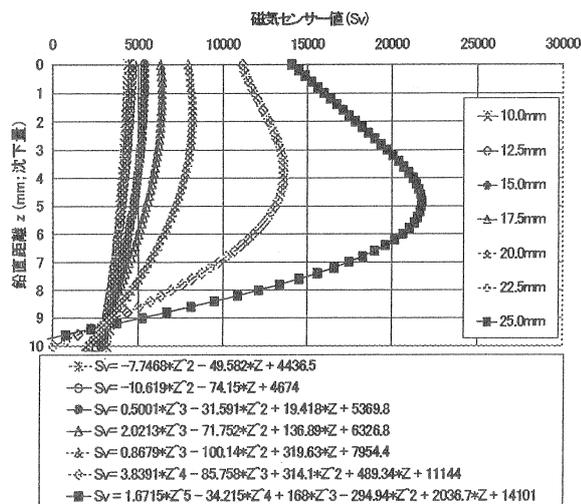
なお、磁石の埋め込み場所が $r=17.5\text{mm}$ の場合はch7およびch8から等距離で、かつセンサーからの距離も離



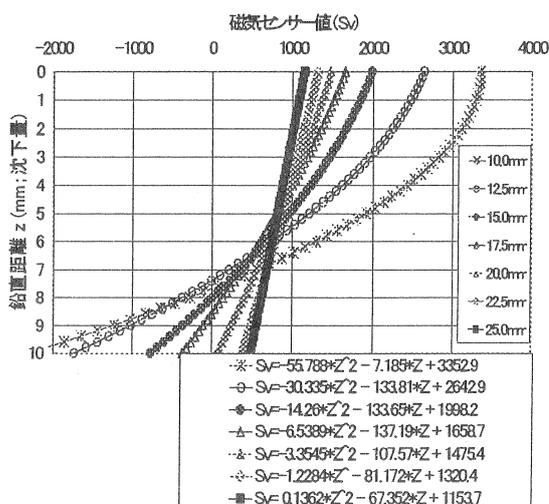
(a) キャリブレーション実験曲線(Ch 7)



(b) キャリブレーション実験曲線(Ch 8)

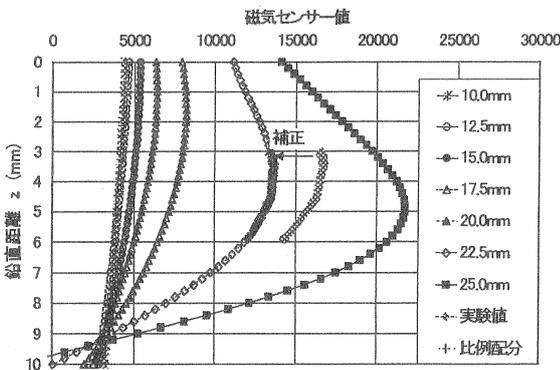


(c) キャリブレーション近似曲線(Ch 7)

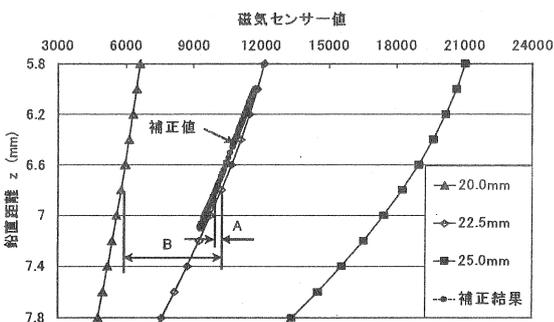


(d) キャリブレーション近似曲線(Ch 8)

図-4 半径位置別の鉛直距離と磁気センサー値の関係



(a) 一次元圧密時(Ch 7)



(b) 三次元圧密時(Ch 7)

図-5 磁気センサー値から水平方向変位の算出方法

れている。そして、磁気センサーの特性から、磁気センサーから遠い所では鉛直位置の違いによる磁気センサー値の違いと水平位置の違いによる磁気センサー値の違いを分離することが難しい。そのため、図-4における磁石埋め込み位置(半径位置)の違いによる磁石の鉛直位置と磁気センサー値の関係の違いが小さいため、三次元圧密中の磁気センサー値のわずかな変化が、半径方向変位に換算した時に、非常に大きな差として表れることに注意する必要がある。

#### 4.2 磁気センサー値による水平方向変位の算出方法

図-5には半径方向変位の算出方法として、磁石の埋め込み位置が  $r=22.5\text{mm}$  で、圧密荷重を  $9.8\text{kPa}$  から  $157\text{kPa}$  まで荷重増加率1で底面排水のみの一次元圧密を行った後、増加荷重  $157\text{kPa}$  で排水を内向き放射流れの三次元圧密を行った場合を例に取り、Ch7を用いた水平方向変位の計算過程を説明する。

まず、圧密圧力が  $9.8\text{kPa}$  から  $157\text{kPa}$  までは一次元圧密であるので磁石の半径方向変位は生じないため、磁石埋め込み位置が  $r=22.5\text{mm}$  のキャリブレーション値と一致するはずである。しかし、磁石のわずかな埋め込み誤差によって実際の磁気センサー値は図-5(a)に示すよう

にキャリブレーション値と一致しない場合が多い。そこで、三次元圧密を開始するまでの一次元圧密時の測定値と同じ条件でのキャリブレーション値が一致するように比例配分を行って全測定期間の測定値を補正した。そして図-5(b)に示す三次元圧密中の磁気センサー値と  $r=22.5\text{mm}$  でのキャリブレーション値の差は、磁石が半径方向に変位したために生じたものだと考えて、この差と磁石埋め込み位置 20, 22.5, 25mm のキャリブレーション値との相互関係から水平方向変位を算出する。具体的には、補正した測定値が  $r=22.5\text{mm}$  のキャリブレーション曲線より右側にずれる ( $r=25.0\text{mm}$  のキャリブレーション曲線に近づく) 場合は、磁石は外側へ移動していることを表しており、逆に左側にずれる ( $r=20.0\text{mm}$  のキャリブレーション曲線に近づく) 場合は、磁石は内側へ移動していることを表す。図-5(b)に示した例では、補正した測定値が  $r=22.5\text{mm}$  のキャリブレーション曲線より左側にずれており、この場合のある鉛直位置での水平変位は、補正した測定値と  $r=22.5\text{mm}$  のキャリブレーション曲線との差 (A) と、 $r=20.0\text{mm}$  と  $22.5\text{mm}$  のキャリブレーション曲線の差 (B) より、 $\delta r=2.5A/B$  (mm) として求められ、これが  $r=22.5\text{mm}$  の位置から  $r=20.0\text{mm}$  の位置に向かって内側へ水平に変位した量となる。

### 5. 三次元圧密時の供試体内部の挙動

本実験に用いた試料は、京都府舞鶴市舞鶴港和田地区で採取した舞鶴粘土を室内で練り返し、再圧密したもので、その物理的特性は、 $G_s=2.737$ ,  $w_L=83.32\%$ ,  $I_p=52.17$  である。試料を、まず、 $425\mu\text{m}$  のふるいに通して粗粒分を除去し、液性限界の約 2 倍の含水比 (170%) に調整した。含水比の調整を行ったスラリー状の試料を攪拌機に入れ、真空ポンプで脱気を行いながら 6 時間攪拌する。脱気済みの粘土スラリーを直径 247.4mm、高さ 400mm の円筒型圧密容器に静かに流し込み 24 時間自重圧密させる。その後、载荷は  $1.96 \rightarrow 7.84 \rightarrow 29.4 \rightarrow 49\text{kPa}$  の圧密圧力にて 24 時間サイクルで段階的载荷を行う。49kPa における圧密終了時刻は 3t 法によって定めた。圧密終了後、予圧密容器から取り出した試料は、試料の変質や含水比の変化などを防ぐために直ちに、ワイヤーソーにてケーキ状に 6 等分し、ラップフィルム、アルミホイルで包み、更にパラフィンでコーティングして  $20^\circ\text{C}$  の恒温室内で保存した。

実験方法としては、まず底面排水の一次元圧密条件で所定圧力まで予圧密を行った後、供試体中央に設置したドレーンからの排水のみを許した三次元圧密を行い、沈下量、間隙水圧及び前述の方法で供試体内部の変位を測定する。また、供試体は標準圧密試験と同じく直径 60mm、高さ 20mm のものを使用している。

三次元圧密時の供試体内部の挙動を調べるために行った模型実験は表-1 に示すとおりである。この表に示すとおり磁石の埋め込み位置は供試体中心から  $r=12.5/17.5/22.5\text{mm}$  の 3 パターン、最終圧密荷重を  $p=157/314/628\text{kPa}$

の 3 パターンの全 9 ケースとした。ここで、 $r$  は供試体の中心から磁石埋め込み位置までの距離を表している。また、図-6 は本実験での磁石の埋め込み位置を表したものである。

なお、磁石は供試体の上面から 3mm のところに埋め込んだ。そして、半径方向に排水を行った等(鉛直)ひずみ条件の三次元圧密時には鉛直ひずみは供試体内で鉛直方向にも均一に生じるために、供試体全体の沈下量(圧縮量)より平均鉛直ひずみを求め、供試体上面から磁石埋め込み位置の間でも同じ鉛直ひずみが生じていると仮定して任意時刻の磁石の鉛直位置を算出した。

#### 5.1 三次元圧密実験および考察

まず、図-7 に Case 2 で磁石位置が異なる場合の三次元圧密開始後の供試体沈下量と時間関係を示す。図から分かるように、同じ圧密圧力に対しては、最終沈下量、圧密速度ともによく一致しており、本実験装置における実験の再現性が確認できる。

次に、図-8 は Case 2-b (磁石埋め込み位置  $r=17.5\text{mm}$ ) における三次元圧密開始からの供試体底面 3 箇所 ( $r=8, 17, 26\text{mm}$ ) での間隙水圧消散過程を示したものである。この図から分かるように、排水距離が短い所ほど間隙水圧の消散が速い。しかし、排水距離の最も短い  $r=8\text{mm}$  の位置の間隙水圧は、三次元圧密開始直後にほぼ消散が

表-1 実験ケース

	磁石位置 $r(\text{mm})$ a/b/c	予圧密荷重 (kPa)	圧密圧力 (kPa)
Case 1	12.5/17.5/22.5	78.5	157
Case 2	12.5/17.5/22.5	157	314
Case 3	12.5/17.5/22.5	314	628

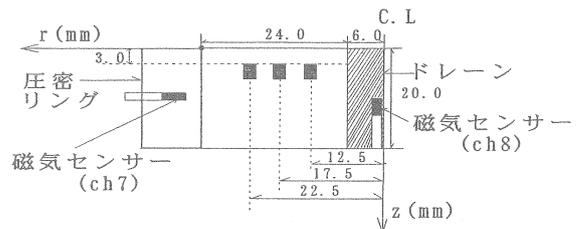


図-6 磁石の埋め込み位置

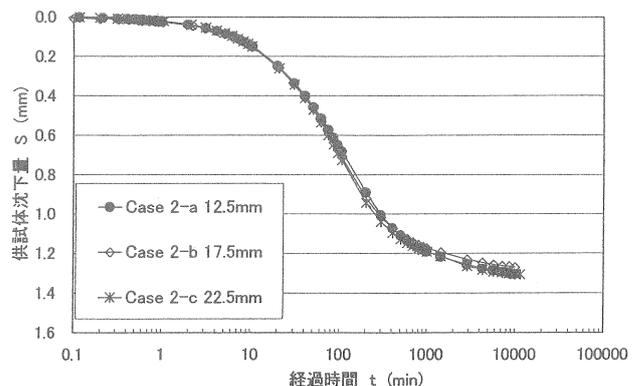


図-7 三次元圧密による供試体沈下量 ( $\Delta p=157\text{kPa}$ )

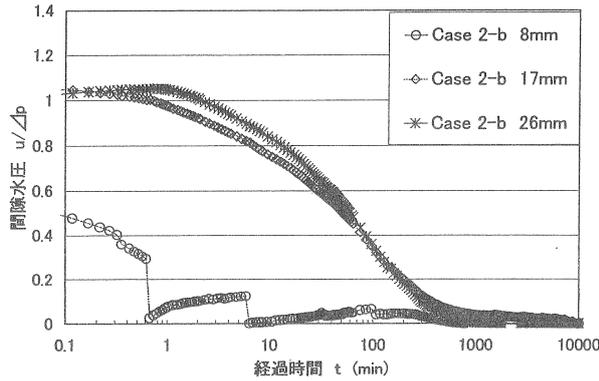


図-8 間隙水圧の消散過程 ( $\Delta p=157\text{kPa}$ )

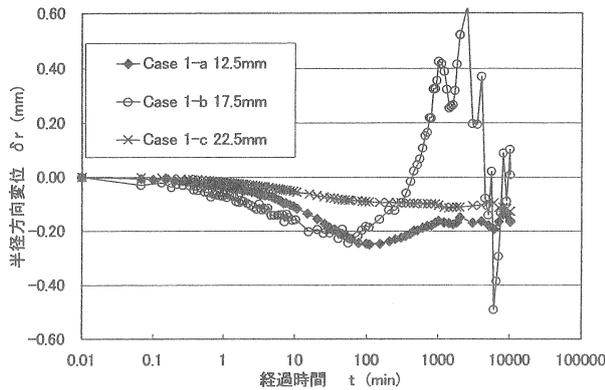
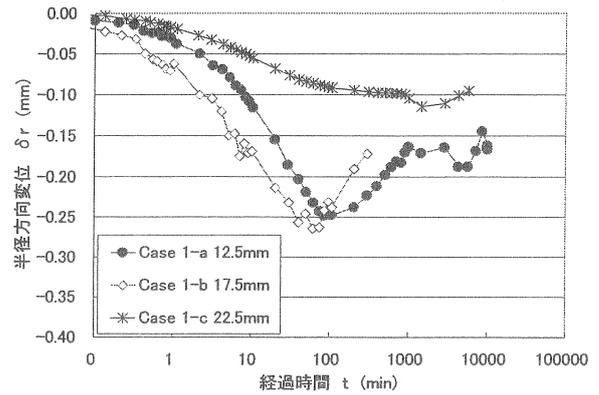


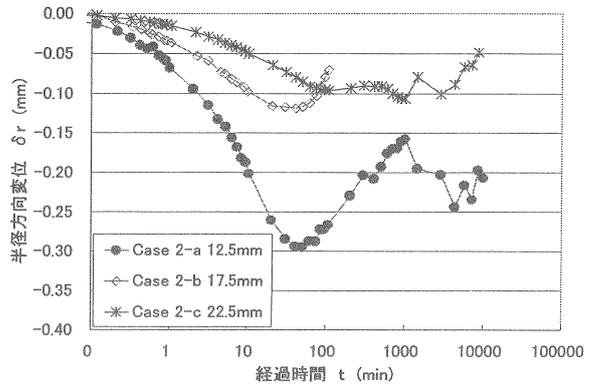
図-9 磁石の半径方向変位～時間関係 ( $\Delta p=78.5\text{kPa}$ )

終了するなど不自然な挙動をしている。これは、 $r=8\text{mm}$ で間隙水圧を測定するためのポーラスストーンと供試体中央に設置したドレーンとの間の距離が短いため(2mm)、この間に水みちのようなものが形成されたか、あるいは間隙水圧計測器の不具合によるものだと考えられる。また、 $r=17, 26\text{mm}$ では圧密初期に  $u/\Delta p > 1$ となる間隙水圧が発生している。これは本実験の境界条件が等ひずみ条件となっているため、圧密過程中、沈下は一樣である反面、応力は不等分布となり非排水面へ集中すること、および非排水面側では圧密初期にせん断変形が卓越するため負のダイレイタンスによって付加的な過剰間隙水圧が発生したことが原因として考えられる。

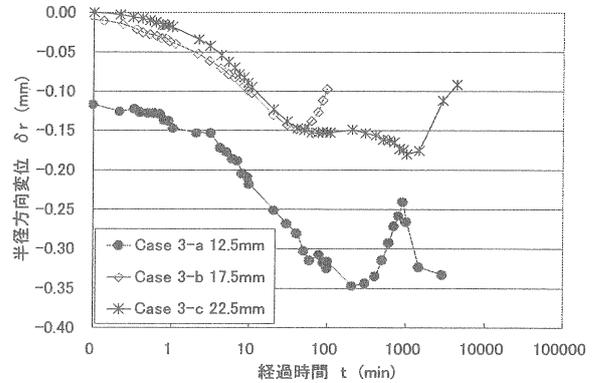
図-9は、磁石の半径方向変位～時間関係の一例としてCase1の結果を示している。図より、経過時間が1000分を超えたあたりから磁石の半径方向変位が周期的に変化している。この周期的な変動の原因を究明できなかったが、変動は1日周期で発生しているため、この1日周期のデータの変動を排除するために、1000分を超えるデータについては実験装置の環境がほぼ同じになると考えられる毎日同じ時刻のデータを1日間隔で採用することにした。次にCase1-b( $r=17.5\text{mm}$ )の半径方向変位を見ると、300分付近で正の変位になっており、その後の周期的な変動が激しい。この傾向は圧密荷重の大きさに関係なく他のCaseでも発生している。磁石埋め込み位置 $r=17.5\text{mm}$ は、ch7およびch8から等距離で、他の磁石埋め込み位置と比べて磁気センサーの距離が一番遠い。このために



(a) 圧密圧力  $157\text{kPa}$  ( $\Delta p=78.5\text{kPa}$ )



(b) 圧密圧力  $314\text{kPa}$  ( $\Delta p=157\text{kPa}$ )



(c) 圧密圧力  $628\text{kPa}$  ( $\Delta p=314\text{kPa}$ )

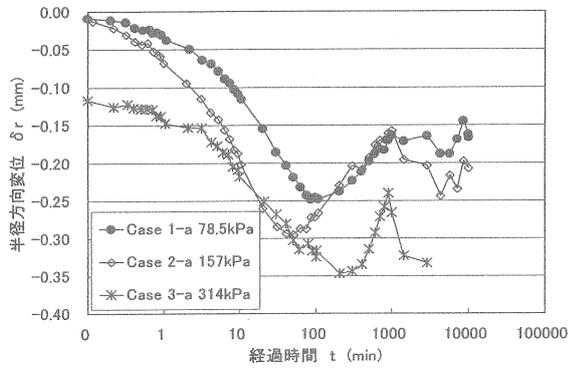
図-10 半径方向変位

磁気センサーの特性から、磁気センサーに出力される磁界強度の変化が小さく、前述の周期的な変動の影響を大きく受けてしまうと考えられる。なお、前述したように、磁石埋め込み位置が $r=12.5\text{mm}$ の場合は、ドレーン内部磁気センサー(Ch8)を用い、 $r=22.5\text{mm}$ の場合は圧密リング内部の磁気センサー値(Ch7)を用いて半径方向変位を算出している。この両ケースの周期的な変動の影響は $r=17.5\text{mm}$ の場合と比較すると明らかに小さく、ほとんどのケースで影響が見られず、影響のあるもので最大 $0.03\text{mm}$ 程度であった。

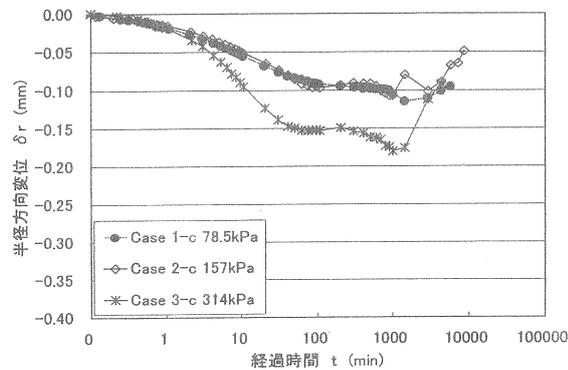
図-10は圧密圧力ごとの磁石の半径方向変位～時間関係を示している。図より半径方向変位 $\delta r$ は、圧密初期

にドレーン側(内側)に変位してピークを迎えた後、非排水面側(外側)に向かって変位している。これは前述した三次元圧密の内部挙動メカニズムで説明した通りであるが、半径方向変位は元の位置まで戻っていないことから、粘土の塑性体としての性質が現われたと考えられる。半径方向変位のピークの大きさは、磁石位置  $r=12.5\text{mm}$  で  $\delta r=0.25\sim 0.35\text{mm}$  となり、磁石位置  $r=22.5\text{mm}$  の  $\delta r=0.10\sim 0.18\text{mm}$  より大きい。また、ピークの出現時刻は  $r=12.5\text{mm}$  で 100 分付近、 $r=22.5\text{mm}$  で 1000 分付近であり、明らかに差が見られる。また、全体的に  $r=12.5\text{mm}$  の磁石変位は明確なピークが見られるのに対し、 $r=22.5\text{mm}$  の場合はピークがはっきりと現われない傾向がある。なお、 $r=17.5\text{mm}$  の 300 分以後のデータは、前述した理由によって図-9 と同じように大きく変動して図が煩雑になるため省略した。

また、図-11 は圧密圧力の違いによる半径方向変位の違いを比較したものである。(a)の  $r=12.5\text{mm}$  の半径方向変位は圧密圧力が大きいほどピークの値が大きくなる傾向がある。しかし、ピークの出現時刻は各圧密圧力でばらついており、明確な傾向が見られない。(b)の  $r=22.5\text{mm}$  の位置では  $\Delta p=314\text{kPa}$  の半径方向変位が大きい、他の 2 ケースはほぼ同じ値となっている。ここで、 $\Delta p=78\text{kPa}$  と  $157\text{kPa}$  の場合は、 $\Delta p$  を載荷後、過剰間隙水圧がほぼ  $\Delta p$  まで上昇してから排水を開始したが、 $\Delta p=314\text{kPa}$  の場合は手違いから  $\Delta p$  を載荷する時点から排水を許していたため、圧密開始時に過剰間隙水圧が  $\Delta p$  付近まで上



(a)  $r=12.5\text{mm}$



(b)  $r=22.5\text{mm}$

図-11 半径方向変位～時間関係(磁石位置別)

昇することなく載荷段階から排水が起こり、圧密が速く進んだため半径方向変位が他のケースより大きくなったと思われる。このことから、半径方向変位は間隙水圧の消散過程に大きく依存していると考えられる。なお、 $r=17.5\text{mm}$  に対しては Ch7 と 8 の両方の磁気センサーからの距離が共に遠くてばらつきが多かったため省略した。また、図-11 (a)で見られるような圧密の後半部に半径方向変位が再びドレーン側へ動くのは二次圧縮の影響と考えられる。

## 6. 弾性理論との比較

粘土を弾性体としたときのバーチカルドレーンによる三次元圧密挙動を理論解によって求め、実験値と比較した。解析に用いた弾性パラメータを表-2 に示す。なお、この解析では鉛直方向変位に対して半径方向変位がどのように発生するか注目しているため、圧密定数は実験値に  $\log t$  法を適用して求めた一次圧密沈下量と一次圧密領域の圧密速度が一致するようにフィッティングによって決定している。粘土を弾性体としたときの解析は、吉国の三次元圧密理論を前述の等ひずみ条件のもとで解いた厳密解を用いて行った。吉国の三次元圧密方程式は文献 6、厳密解の誘導については文献 7 を参照されたい。

表-2 解析条件

Case No.		$m_v$ ( $\text{m}^2/\text{kN}$ )	$c_h$ ( $\text{cm}^2/\text{min}$ )	H (mm)	$\Delta p$ (kPa)	r (mm)
Case 1	A	9.87E-4	3.07 E-2	18.196	78.5	12.5
	B	8.31E-4		17.841		17.5
	C	9.37E-4		17.831		22.5
Case 2	A	4.56E-4	3.88 E-2	16.582	157	12.5
	B	4.62E-4		16.445		17.5
	C	4.58E-4		16.479		22.5
Case 3	A	2.14E-4	4.86 E-2	15.129	314	12.5
	B	2.10E-4		15.213		17.5
	C	2.14E-4		14.976		22.5

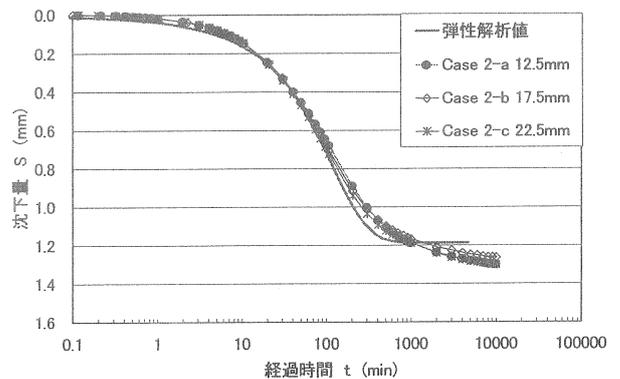


図-12 沈下～時間関係 ( $\Delta p=157\text{kPa}$ )

図-12にCase2の供試体沈下量と時間の関係について実験値と弾性解析値の比較を示す。弾性モデルを用いた解析値は二次圧密挙動を表現できないため圧密後半部分では一致しないものの一次圧密過程では実験値とほぼ一致している。さらに、一次圧密過程を詳細に見てみると圧密後半部分の圧密速度は解析値の方が実験値より早く進行する傾向がある。これは、実験値の圧密後半では二次圧密の影響が現われるためと考えられる。

図-13はCase2の荷重条件における $r=8, 17, 26\text{mm}$ の位置での間隙水圧の消散過程を比較したものである。解析でも排水距離が長くなるほど間隙水圧の消散が遅れるという現象は再現できている。しかし、実験値の非排水面側で $u/\Delta p=1$ を超える現象については弾性解析では再現できていない。これは前述したように弾性モデルでは圧密の進行に伴う応力集中とせん断変形に伴うダイレイタンシー効果を表現できないためと考えられる。

また、図-12の沈下量と時間関係で表した場合の圧密速度は二次圧密領域を除いて解析値と実験値で一致するが、図-13の間隙水圧と時間関係で表した圧密速度は一致せず、実験値の方が圧密前半で消散が速い。すなわち、ひずみに関する圧密度より応力(間隙水圧)に関する圧密度が大きいことを示している。これについて三笠<sup>8)</sup>の $f(1+e) \sim \log p$ を直線とした非線形弾性圧密理論ではひずみに関する圧密度が応力に関する圧密度より速いという結果を得ているが、本実験ではこれと逆の結果となった。また、今井<sup>9)</sup>も層別計測型圧密試験機を用いた一次元圧密試験において本実験と同様な傾向となる結果を得ている。これは、ひずみ速度がある程度大きな場合の $f \sim \log p$ 関係は上に凸な曲線になるため、ひずみの進行より有効応力の増加(間隙水圧の消散)が速くなるためと考えられる。

図-14はCase2の供試体中の磁石の半径方向変位-時間関係について実験値と解析値を比較したものである。なお、解析における要素分割の都合上、解析値の位置は実験値の位置と一致しないため、実験値に最も近い位置の解析値を比較に用いた。半径方向変位のピークの大きさについては、値に差はあるもののドレーン側が大きく非排水面側が小さいこと、圧密圧力が大きくなるにつれてピークの出現時間が早くなるという傾向を解析で再現できている。しかし、解析では一次圧密終了時に半径方向変位が完全に回復するのに対して実験値では少し回復する傾向が見られるが完全には回復しないという違いが見られる。

図-15は半径方向位置 $r=12.5\text{mm}$ での磁石の半径方向変位-時間関係について実験値と解析値を示したものである。解析では荷重増分 $\Delta p$ が大きいほど半径方向変位のピーク値が小さくなっているが、実験半径方向変位は荷重増分 $\Delta p$ が大きいほどピーク値が大きくなる逆の結果となっている。これらの理由については現段階では明らかにすることができず、今後の課題の一つである。

また、前述したように、解析では圧密終了時に半径方

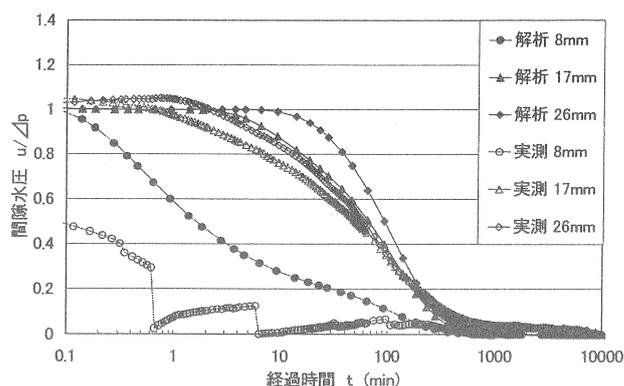


図-13 間隙水圧消散過程 ( $\Delta p=157\text{kPa}$ )

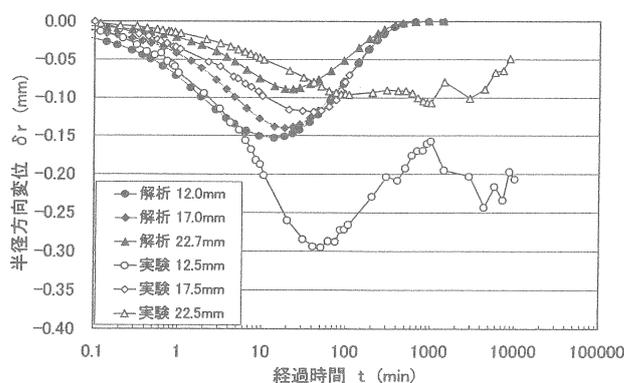


図-14 半径方向変位 ( $\Delta p=157\text{kPa}$ )

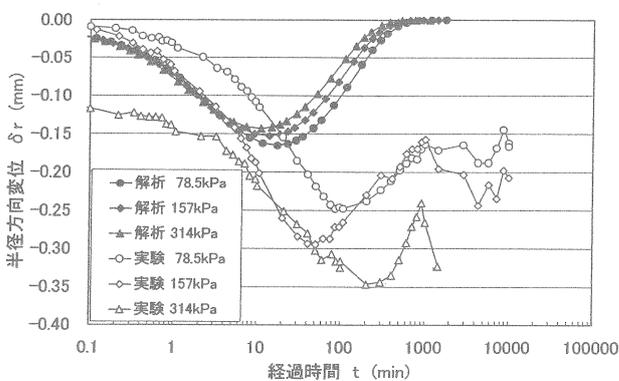


図-15 半径方向変位 ( $r=12.5\text{mm}$ )

向変位は完全に回復しゼロになっているが、実験値では回復せず、さらに二次圧密過程になると再び内側に向かって変位している。このように、弾性解析では圧密初期に生じたドレーン側への半径方向変位が圧密終了時に完全に回復しており、実現象と異なった結果となる。これは粘土が弾性体ではなく、塑性や粘性の性質を含んでいるためと考えられる。そのため実際の粘土は圧密初期にドレーン側の要素で大きな体積ひずみが生じた際に、同時に塑性硬化も起こし、その結果として、圧密後半で生じるはずのせん断ひずみが小さくなり完全に元の位置に戻らず、さらに二次圧縮によって体積ひずみが生じ続けるため、このような挙動になったと思われる。

## 7. まとめ

バーチカルドレーンによる三次元圧密時の地盤内部挙動を明らかにするため、バーチカルドレーン打設地盤をモデル化した三次元圧密試験機を用いて模型実験を行うとともに、弾性圧密理論に基づく解析値との比較を行った。その結果得られた主な結果は以下のとおりである。

- 1) 粘土供試体内部に埋め込んだ小型磁石の磁界強度の変化を供試体外部に設置した磁気センサーで測定することによって供試体内部の変位挙動を計測することができる。
- 2) バーチカルドレーン打設地盤の三次元圧密過程では、圧密初期に非排水面側要素ではせん断変形により負のダイレイタンシーが発生する。また、鉛直等ひずみ状態の三次元圧密過程では非排水面側に応力集中が起り半径方向に鉛直全応力の分布が生じる。この2つの要因により圧密初期の間隙水圧比  $u/\Delta p$  は非排水面側で1を超える。
- 3) 三次元圧密過程では、供試体内部は鉛直沈下だけではなく、圧密前半部ではドレーン側(内側)に向かって水平方向に変位し、圧密後半では外向きに変位するが、元の位置までは戻らない。その傾向はドレーン側で顕著であり、非排水面側ではほとんど元の方向へ戻らない。また、半径方向変位量はドレーン側ほど大きくなり、圧密圧力の増加とともに大きくなる。
- 4) 弾性圧密理論の適用性を比較した結果、弾性モデルでは粘土の持つ粘性、塑性を考慮していないために、本実験で得られたようなバーチカルドレーンを用いた粘土の三次元圧密挙動を一次圧密領域においても再現できない。
- 5) 一次圧密終了以降の半径方向変位は、ドレーン側要素ではドレーン側へ、また非排水面側要素では非排水面側へ変位している。これは二次圧縮の影響である可能性があり、今後の検討課題である。

## 参考文献

- 1) 栗原則夫:深い地盤改良の実際と問題点を考える, 2. バーチカルドレーン工法の実際と問題点(2), -高速道路盛土の事例 -, 土と基礎, Vol. 30, No. 11, pp. 81-87, 1982.
- 2) Barron, R. A. : Consolidation of fine-grained soils by drain wells, Trans. of ASCE, Vol. 113, pp. 718-754, 1948.
- 3) Yoshikuni, H., Kusakabe, O., Hirao, T., Ikegami, S. :Elasto-viscous modeling of time-dependent behavior of clay, Proc. of the 13th ICSMFE, New Delhi, India, Vol. 1, pp. 417-420, 1994.
- 4) 森脇武夫, 加納誠二, 吉国洋:弾粘性圧密理論の三次元化とバーチカルドレーンによる圧密への適用(その1), 第33回地盤工学研究発表会発表講演集, pp. 483-484, 1998.
- 5) 住岡宣博, 吉国洋:サンドドレーン改良地盤の圧密メカニズムの考察, 土木学会論文集, No. 463/III-22, pp. 65-74, 1993.
- 6) 吉国洋:バーチカルドレーン工法の設計と施工管理, 技報堂出版, pp. 29-69, 1979.
- 7) 熊本直樹:バーチカルドレーン打設地盤の圧密変形に関する研究, 広島大学学位論文, pp. 9-90, 1988.
- 8) 三笠正人:軟弱粘土の圧密, 鹿島出版社, pp. 11-19, 1963.
- 9) Imai, G. : Analytical examinations of the foundations to formulate consolidation phenomena with inherent time-dependence, Proc. of the International Symposium on Compression and Consolidation of Clayey Soils, IS-Hiroshima'95, Vol. 2, pp. 891-935, 1995.